

도로소음 저감을 위한 타이닝 간격 랜덤화에 관한 연구

A Study on Randomization of Tining Space for Reducing Road Noise

정 순 철* · 우 중 원* · 김 용 수* · 이 재 응†

Soon Chul Jung, Jong Won Woo, Yong Soo Kim and Jae Eung Lee

(2005년 1월 5일 접수 : 2005년 6월 27일 심사완료)

Key Words : Tining Space(타이닝 간격), Whine Noise(화인 노이즈), Mechanical Frequency Modulation(주파수 변조), LCG Algorithm(LCG 알고리즘), Probability Density Function(확률 밀도 함수)

ABSTRACT

When driving on uniformly tining concrete pavement road, the whine noise which has high spectrum at the specific frequency related to the uniform tining space exist. In this paper, a randomization method of tining space for concrete pavements is proposed to reduce the whine noise. The proposed method is developed based on the LCG(linear congruential generator) algorithm. The design parameters used in the method are number of different tining space, ratio of each tining space, total tinings of each size, sequence of actual tining under given constant drag length and texture. Monte Carlo simulations are used to validate the proposed method.

1. 서 론

차량이 주행시에 발생하는 소음은 크게 엔진, 흡기계, 배기계 등에서 발생하는 차량의 기계적 소음과 타이어와 노면의 상호작용에 의하여 발생하는 타이어 소음으로 나눌 수 있는데 차량의 주행 속도가 증가할수록 타이어/노면 소음의 비중이 높아지게 되며⁽¹⁾, 타이어/노면 소음중에서도 타이어와 노면과의 주기적인 충돌에 의하여 발생하는 피치 노이즈(pitch noise)의 비율이 지배적이다.⁽²⁾

콘크리트 포장의 경우 노면의 마찰력 문제와 배수 문제 등으로 인하여 일정 간격의 타이닝 홈을 파서 표면처리를 한다. 그러나 기존과 같이 타이닝 간격이 일정한 경우 타이어 트레드 패턴과 도로표면과의 충

격이 주기적으로 발생하게 되어 특정주파수의 소음이 크게 되는 화인 노이즈(whine noise)⁽³⁾가 발생한다. 이런 현상은 일정한 타이닝 간격을 불규칙하게 변화시켜 충격 주기를 불규칙하게 함으로서 특정주파수에 집중된 가진 에너지를 넓은 범위의 주파수 대역으로 그 에너지를 분산시킴으로서(주파수 변조(mechanical frequency modulation) 이론⁽⁴⁾) 화인 노이즈의 크기를 줄일 수 있다.

기존의 도로포장 노면 패턴에 관한 연구를 살펴보면 콘크리트 포장의 타이닝을 랜덤하게 하여 소음도를 측정된 결과는^(3,5) 다소 있다. 그러나 어떤 방법으로 랜덤화를 하였는지에 대한 언급은 전혀 없이 시행착오적인 방법으로 실험하여 체계적인 랜덤화에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 사실 타이닝 간격을 랜덤화하기 위해서는 몇 가지 제약조건이 있다. 우선 시공환경을 고려하여 주어진 드래그 스펜길이 내에서 최대한 랜덤화를 하여야 하고, 노면의 수명에 지장이 없게 최소 타이닝 간격이 타이닝 홈의 폭보다 충분히 길게 선정하여야 하며, 또한 마찰기능을 고려하여 단위길이당 texture를 유지하게 하여야 한다.

† 책임저자 : 정희원, 중앙대학교 기계공학부
E-mail : jelee@cau.ac.kr
Tel : (02)820-5284, Fax : (02)824-8130

* 중앙대학교 대학원 기계공학부

이 연구에서는 콘크리트 포장의 타이닝 간격 랜덤화 방법에 대한 연구를 수행하였다. 사용한 조건은 드래그 스펠길이 2 m, 타이닝 홈의 폭 3 mm, 그리고 texture는 2 m 당 60~63개의 타이닝을 유지하도록 하였다(현재는 30 mm 등간격으로 시공하므로 2 m 당 60개). 노면 프로파일의 설계변수로는 타이닝 간격 종류, 각 간격 종류의 구성비, 최대 간격과 최소 간격비, 그리고 실제적인 타이닝 간격 배열(sequence)을 선정하였다. 주어진 조건을 만족시키면서 불규칙하게 타이닝 간격 배열을 생성하기 위하여 이 연구에서는 LCG 알고리즘을 응용한 방법을 제안한다.

2. 콘크리트 포장의 확인 노이즈

서론에서 언급한 바와 같이 현재의 콘크리트 포장 도로 표면에는 Fig.1과 같이 폭 3 mm, 깊이 3 mm의

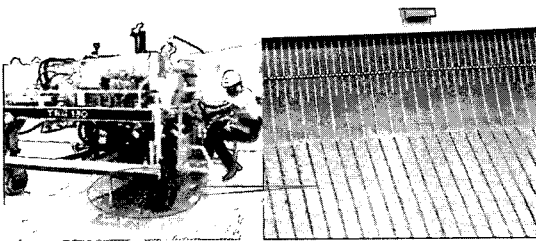


Fig. 1 Tining of concrete pavements

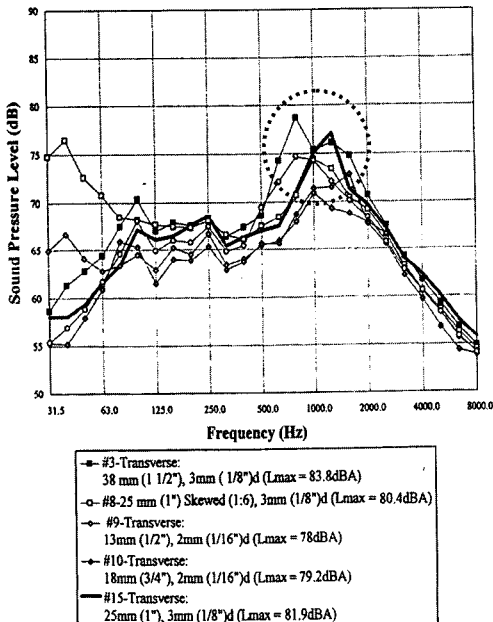


Fig. 2 Spectra of uniform tining

타이닝을 30 mm의 일정한 간격으로 타설을 하는데 이 타이닝에 의하여 특정 주파수에서의 확인 노이즈가 발생한다.

이러한 확인 노이즈는 아스팔트 포장보다 더 큰 소음을 발생시키며 1 kHz에 집중되어 사람에게 불쾌한 소음으로 작용한다. 예를들면 Fig.1과 같이 타설한 콘크리트 도로를 100 km/h로 주행을 하면 타이어를 가진하는 주요 주파수 성분은 841.75 Hz가 되어 주행 시 실내외 소음의 원인이 된다. Fig.2는 콘크리트 포장에서 등간격 타이닝으로 시공된 경우 측정된 소음의 스펙트럼과 그 음압도⁽⁵⁾의 예를 나타낸 것이다.

3. LCG(Linear Congruential Generators) 알고리즘

LCG(linear congruential generators) 알고리즘이란 [0,1) 사이의 연속된 수 { U_i }를 생성하는 알고리즘으로써 1948년에 D. H. Lehmer에 의해 제안되었으며 다음과 같은 식으로 표현된다.⁽⁶⁾

$$X_i = (aX_{i-1} + c) \text{ mod } M$$

$$U_i = X_i / M$$

$$0 \leq a, c, X_0 \leq M-1$$

(1)

여기서 a 는 multiplier, c 는 increment, M 은 modulus, X_0 는 seed를 의미한다. $a \text{ mod } b$ 의 의미는 a 를 b 로 나누었을 때의 나머지를 나타내며, 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$a = bk + (a \text{ mod } b) \quad a, b, k \text{는 정수} \quad (2)$$

$-c$ 가 '0'일 경우를 "Multiplicative congruential generator"라 하고 { U_i }는 (0,1)의 값을 가지게 되며, $c \neq 0$ 인 경우를 "Mixed congruential generator"라 하고 { U_i }는 [0,1)의 값을 가지게 되는데 (0,1)는 0과 1을 포함하지 않는 구간을 의미하며, [0,1)는 0은 포함하고 1을 포함하지 않는 구간을 의미한다. 또한 나머지의 가지는 M 개가 되므로 $M+1$ 번째의 수는 처음 수와 동일하게 되는데 이것 때문에 주기성을 가진다.⁽⁷⁾

LCG 알고리즘에 의해 생성된 배열수는 겉으로 보기에 랜덤처럼 보이지만 계수(a, c, M)의 선택에

따라 랜덤화가 잘 될 수가 있고, 그렇지 못할 수도 있다. 계수 선택에 대한 기존의 연구 결과를 살펴보면 여러 경우의 계수들을 볼 수 있는데 $a=7^5$, $m=2^{31}-1$ 인 경우에 좋은 랜덤 배열을 생성하여 일반적으로 널리 사용되고 또한 상용프로그램에서도 적용하고 있다.⁽⁸⁾

4. 타이닝 패턴 랜덤화 설계 및 시뮬레이션

주행 소음 저감을 위하여 최적으로 타이닝 패턴을 랜덤하게 설계하기 위하여 먼저 몇가지 경우를 시뮬레이션 하였다. 먼저 Fig.3과 같이 타이닝 간격 변화가 사인과 형태를 가지는 모델에 대한 스펙트럼 분석을 수행하였다.

이때 타이닝 간격의 최소값은 10 mm, 그리고 최대값은 70 mm로 하였으며 차량의 주행속도는 100 km/h로 가정하였다. Fig. 4에는 사인과 타이닝 간격 노면의 스펙트럼을 30 mm 등간격의 경우와 비교하여 나타내었는데 특정 주파수에 나타나는 피크의 크기가 크게 감소함을 볼 수 있어, 타이닝 간격의 사인과 형태는 매우 효율적인 타이닝 간격 랜덤화 방법임을 확인할 수 있었다.

또 다른 모델로 MATLAB의 랜덤수 생성 명령어

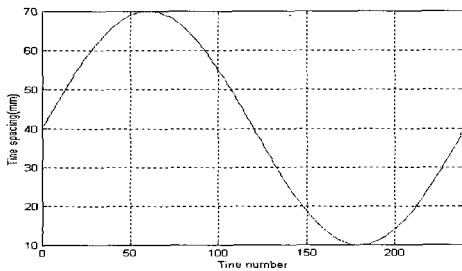


Fig. 3 Sinusoidal tining space

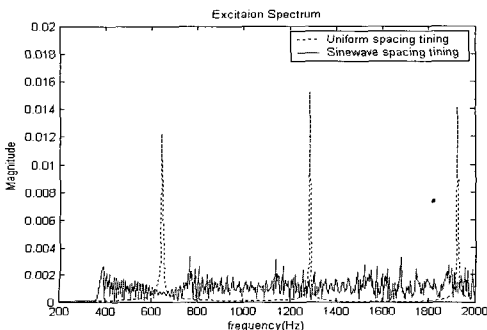


Fig. 4 Spectrum of sinusoidal tining space

를 사용하여 10 mm부터 70 mm까지 0.1 mm 단위의 랜덤 타이닝 배열을 생성 후 이를 타이닝 간격으로 가지는 노면의 입력 스펙트럼을 분석하여 Fig.5에 그 결과를 나타내었다. 역시 특정 주파수에 나타나는 피크의 크기가 크게 감소함을 볼 수 있어, 효율적인 타이닝 간격 랜덤화 방법임을 확인할 수 있었다.

그러나 실질적으로 타이닝 패턴을 랜덤하게 설계하기 위해서는 몇가지 고려하여야 하는 다음과 같은 제약조건이 있다.

- (1) 실제 시공에 사용하는 드래그 스펜은 2m로 비교적 짧다.
- (2) 타이닝 홈의 폭이 3mm이므로 실제 타이닝 간격을 일정 값 이하로 작게 할 수 없다.
- (3) 또한 시공을 고려하면 타이닝 간격을 시뮬레이션에서 한 것과 같이 소수점 이하 여러 자리까지 정확하게 설계 할 수 없다.
- (4) 마찰 문제를 고려하면 타이닝 간격을 일정 값 이상으로 크게 할 수 없다. 즉 단위 면적당 texture를 일정하게 유지하여야 한다.

이상과 같은 문제로 인하여 시뮬레이션에서 좋은 결과를 보여준 사인과 형태의 타이닝 간격이나 다양하고 작은 단위의 타이닝 간격을 구현할 수 없으며 제한된 종류의 타이닝 간격을 제한된 횟수로 사용하여 노면 프로파일의 스펙트럼이 랜덤하게 설계하여야 한다.

이 연구에서는 이와 같은 현실적인 문제들을 고려하면서 타이닝 시퀀스의 랜덤화 방법을 제안하였다. 제안된 방법에서는 다음과 같은 설계 변수를 사용하였으며, 각각의 변수들을 변화시키면서 각 변수들이 노면프로파일 스펙트럼에 미치는 영향을 해석하였다.

- (1) 사용된 전체 타이닝 개수(texture)
- (2) 타이닝 간격의 배열(sequence)

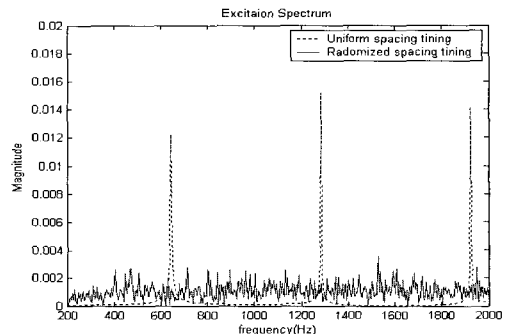


Fig. 5 Spectrum of random tining space

- (3) 타이닝 간격의 종류
- (4) 최대, 최소 타이닝 간격의 비
- (5) 각 타이닝 간격의 구성비(분포형태)

설계 순서는 먼저 여러 가지 경우의 타이닝 최대 간격과 최소 간격 및 간격 종류, 간격 종류별 구성비(분포 형태)를 선정 한 후 이 연구에서 제안한 방법으로 타이닝의 시퀀스를 랜덤화 하여 그 스펙트럼을 평가하였다.

4.1 타이닝 간격 랜덤화 방법

이 연구에서 제안하는 타이닝 시퀀스 랜덤화 방법은 먼저 [0,1)의 값을 갖는 유니폼 랜덤 배열을 LCG 방법을 이용하여 생성한 후 타이닝 간격의 종류와 동일한 수로 균등하게 구간을 나누어 각 구간의 범위 내에 있는 값들은 특정한 타이닝 간격 값을 갖게 하였다. 예를 들면 20 mm, 30 mm, 40 mm의 타이닝 간격을 랜덤 배열할 경우 [0, 1)의 값을 갖는 랜덤 배열을 생성 후, 배열의 요소값이 0<배열의 요소값 ≤1/3이면 20 mm를, 1/3<배열의 요소값 ≤2/3이면 30 mm를, 2/3<배열의 요소값 ≤1 이면 40 mm를 배정하였다.

또한 정규분포를 갖는 랜덤 타이닝 배열을 설계할 경우에도 유사한 방법으로 구간을 나누어서 각 타이닝 간격값을 갖게 하였다.

4.2 해석 노면의 모델의 선정

각 노면 모델의 선정시 제한 조건으로는 기존 등간격 타이닝 노면의 마찰력 수준을 유지하기 위하여 단위면적당 texture를 기존의 경우와 같게 하였다(2m 당 62~63개). 따라서 타이닝 최대 간격의 증가로 마찰력의 감소가 예상될 경우 간격 종류 및 간격 종류의 분포를 조정하여 단위면적당 texture를 일정 수준으로 유지하였다.

다음은 타이닝 설계 변수들을 변화시키면서 45가지 (Model No.1~Model No.45)의 타이닝 간격 랜덤 배열을 생성하였다. Table 1은 그 중 몇 가지 모델의 타이닝 간격과 그 구성비를 나타낸다.

- (1) 각각의 간격 종류 개수가 등(uniform) 분포
 - ① 최대간격과 최소간격을 변화시킨 모델(모델번호 1~7)
 - ② 간격 종류를 변화시킨 모델(모델번호 8~15)
- (2) 각각의 간격 종류 개수가 정규(normal) 분포
 - ① 정규 분포(모델번호 16~27)

- ② 역정규 분포(모델번호 28~39)
- (3) 모델번호 10과 11의 정규(normal) 분포
 - ① 정규 분포(모델번호 40~43)
 - ② 역정규 분포(모델번호 44~45)

랜덤 타이닝 간격 생성 과정은 다음과 같다. 먼저 사용할 타이닝 간격의 종류와 최소, 최대 간격 비를 선정하고 각 타이닝 간격의 구성비(분포형태)를 결정하였다. 예를 들어 Model No.10(Table 1)은 타이닝 간격을 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm의 다섯가지를 사용하였으며 2m의 한 드래그 스펙 내에 각 타이닝 간격이 각각 12번~13번 사용되었다는 뜻이다. Model No.45는 타이닝 간격을 10 mm부터 50 mm까지 5 mm간격의 9가지를 사용하였고 2 m 드래그 스펙 내에 사용된 각 간격의 구성비는 정규분포처럼 25 mm, 30 mm, 35 mm의 타이닝 간격이 10 mm나 50 mm의 타이닝 간격보다 3배 많다는 의미가 된다. 이러한 구성을 갖는 타이닝을 실질적으로 어떠한 순서로 배치하는가는 유니폼 분포를 갖는 랜덤배열을 생성한후 이 연구에서 제안하는 방법(4.1절)으로 타이닝 배열을 설계하였다.

4.3 최적 노면 모델의 선정

노면프로파일의 스펙트럼은 타이어를 가진해 주는 가진 스펙트럼이라고 볼 수 있으며 따라서 생성한 노면 프로파일을 평가하기 위해서는 노면프로파일의 스펙트럼을 평가하여야 한다. 실제 차량 실내에 전달되는 소음은 전달경로의 동특성에 따라 크게 달라질 수

Table 1 Tining space of each pavement model

Model No.	Tining space(mm) and ratio of number of used each tining space
10	10,20,30,40,50(1:1:1:1:1)
40	10,20,30,40,50(1:2:2:2:1)
43	10,20,30,40,50(3:2:1:2:3)
45	10,15,20,25,30,35,40,45,50(1:2:2:3:3:3:2:2:1)
47	10,15,20,25,30,35,40,45,50(3:2:2:1:1:1:2:2:3)

Table 2 The result of spectral analysis

Model No.	Number of things per 2 m rake span	Crest factor	Peak ratio
10	62	1.6131	0.1518
40	62	1.5431	0.1474
43	63	1.5870	0.1471
45	63	1.4819	0.1442
47	63	1.5703	0.1512

있으나 사람의 수음 특성을 고려하여 민감하게 반응하는 주파수 영역의 가진 신호에 가중함수를 주기위하여 노면 프로파일의 스펙트럼은 A가중함수 스펙트럼을 구하였다. 그리고 차량의 실내외의 소음 특성이 500 Hz 옥타브밴드와 1000 Hz 옥타브 밴드영역에서만 나타나므로 스펙트럼의 평가는 이 두 옥타브 밴드의 주파수 영역에서만 수행하였다. 그 다음에는 어떤 스펙트럼이 가장 랜덤한지를 평가하기 위하여 두 옥타브 밴드 영역에서 A가중함수 스펙트럼의 피크비 (peak ratio), 크레스트 팩터(crest factor), 그리고 분산(variance) 값을 계산하였다.

피크비는 위의 등간격 노면 스펙트럼의 최대값과 랜덤 타이닝 간격 모델의 스펙트럼 최대값의 비를 의미하는 것으로 특정 주파수에 집중된 에너지가 얼마나 낮아졌는지를 평가할 수 있어 타이닝 간격의 랜덤화 정도를 파악할 수 있고, 크레스트 팩터는 스펙트럼의 평균값과 최대값의 비를 나타낸 것으로 이 값과 분산으로부터 스펙트럼이 얼마나 평탄(flat) 한지를 평가할 수 있다. 크레스트 팩터를 비교하는 이유는 평균값과 피크값의 차이가 많이 날수록 귀에 거슬리는 소음이 발생하기 쉽기 때문이다.

각 노면 모델의 스펙트럼 분석 결과 모델번호 10, 40, 43, 45, 47이 타 노면 모델에 비하여 크레스트 팩터, 분산, 피크비 값이 작으며 그에 따라 스펙트럼이 다른 모델에 비하여 평탄함을 알 수 있으며 따라서 이와 같은 경우 타이닝을 랜덤하게 배열했을 때 노면과 타이어에 의한 소음을 가장 효과적으로 저감시킬 수 있다. Fig. 6은 모델번호 40, 43, 45의 스펙트럼을 나타낸다.

4.4 노면 모델의 신뢰도 평가(Monte Carlo Simulation)

위 결과로부터 선정된 5가지 노면 모델의 신뢰도

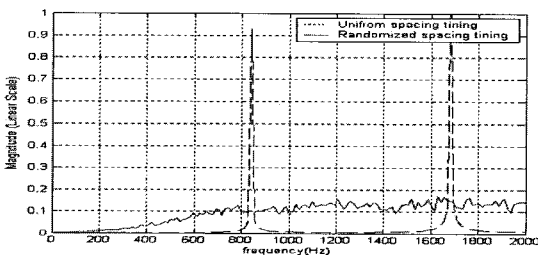
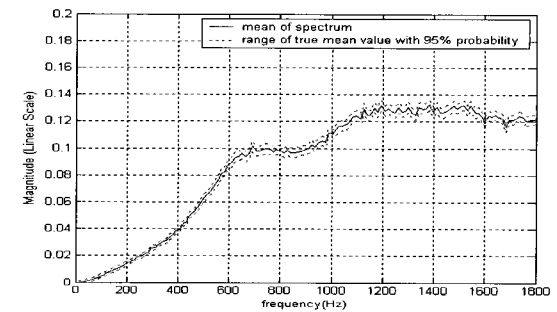


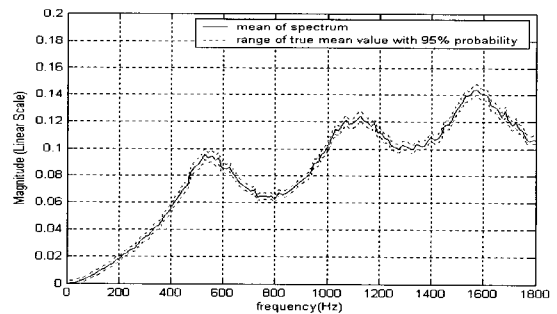
Fig. 6 Contrast of 30 mm uniform spacing tuning and randomized spacing tuning

평가를 위하여 먼저 각각의 경우 대하여 1000개의 랜덤화 노면 프로파일을 생성하여 정밀 분석하였다. 먼저 각 노면 프로파일의 스펙트럼을 평균하여 각 주파수에서의 표준편차를 구한 후, 평균 스펙트럼 참값 (true mean spectrum value)의 신뢰성 구간을 구하는데 사용하였다. 평균값의 표준편차를 데이터수가 유한한(N) 단일 데이터 세트로부터 구하는 경우 그 값은 다음과 같이 구할 수 있으며 student-t 분포 (distribution)를 갖는다.

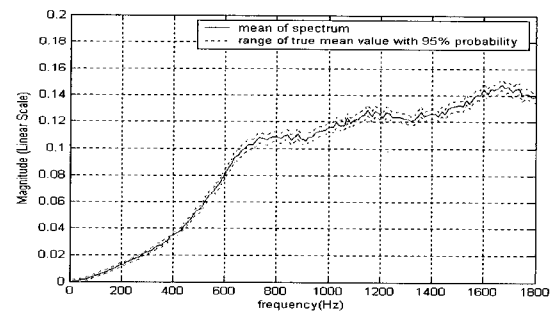
$$S_x = \frac{S_x}{N^{1/2}} : \text{평균의 표준편차} \quad (3)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Mean of spectrum and range of true mean value with 95 % probability of model No.40(a), No.43(b), No.45(c)

여기서 S_x 는 단일 데이터 세트의 표준 편차이다. 따라서 평균값의 참값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x' = \bar{x} \pm t_{\nu, P} S_x \quad (P \%) \quad (4)$$

여기서 t-estimator $t_{\nu, P}$ 는 자유도($\nu = N - 1$)와 확률(probability) P 의 함수이다. 그러나 이 경우처럼 데이터수가 많은 경우에는 student-t distribution은 정규 분포(normal distribution)를 갖게 된다.⁽⁹⁾

Fig. 7은 모델번호 40의 스펙트럼 평균과 95%의 신뢰성 구간을 나타내는데, 가운데 실선은 평균을 나타내며 점선은 95%의 신뢰성 범위를 의미한다.

또한 차량 소음 특성을 고려하여 500 Hz와 1000 Hz 옥타브 밴드 주파수 영역에서 피크가 발생하는 주파수와 그 지점에서 피크값을 Table 3에 나타냈다.

먼저 500 Hz와 1000 Hz 옥타브 밴드 주파수 영역에서 스펙트럼의 크기를 비교하기 위하여 30 mm 등간격 일때 840 Hz에서 발생한 스펙트럼 피크 값과 비교해보면 모든 경우에 그 크기가 약 87~88% 감소한 것을 볼 수 있으며(피크비 0.12~0.13) 이를 환산하면 약 18 dB가 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 특정 주파수에 집중되어 있던 타이어를 가진하는 입력 신호의 최대 크기가 18 dB 감소함을 나타낸다. 실제 소음 크기의 감소량은 전달경로의 동특성에 따라 그 영향이 다르게 나타나게 되는데 이 부분은 계속해서 연구할 부분이다.

그래프와 Table 3으로부터 모델번호 40이 가장 낮은 피크비와 또한 평탄한 스펙트럼을 갖고 있어 가장 좋은 노면 모델로 선정 할 수 있다. 그러나 모델번호 43과 모델번호 45도 신뢰성 구간을 고려해볼 때 역시 좋은 노면 프로파일 후보라 판단된다.

Table 3 True mean value with 95 % probability in 500 Hz and 1000 Hz octave band

Model No.	Frequency of peak	Range of true mean value with 95 % probability
10	1085 Hz	0.1324 ± 0.0039
40	1383 Hz	0.1213 ± 0.0037
43	1126 Hz	0.1246 ± 0.0037
45	1153 Hz	0.1289 ± 0.0040
47	1153 Hz	0.1370 ± 0.0041

5. 결 론

이 연구에서는 소음의 소음 저감을 위한 타이닝 패턴 랜덤화 설계에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 특정의 확률밀도함수(probability density function)를 갖는 랜덤 신호로부터 랜덤 패턴의 타이닝 시퀀스 설계(노면 프로파일 설계)를 할 수 있는 방법을 제안하였으며, 또한 생성된 노면 프로파일의 스펙트럼을 평가하는 방법도 제안하였다. 시뮬레이션에서는 45가지 형태의 노면 형상을 생성하였으며 각 형상에 대하여 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하였다.

(1) LCG 알고리즘을 적용한 타이닝 랜덤 배열 결과 등간격 타이닝에 비하여 훨씬 평탄한 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

(2) 이 연구에서 제안한 방법으로 타이닝 간격 랜덤화 설계를 수행할 경우 시드 번호가 달라 배열 순서가 다른 경우에도 그 확률밀도함수가 같으면 노면 프로파일의 스펙트럼은 변하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

(3) 타이닝 간격의 확률밀도함수가 균일한 경우(uniform 분포)에는 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 또한 타이닝 간격의 종류 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 더 우수하게 나타났다.

(4) 또한 노면 프로파일의 스펙트럼을 결정하는데 있어서 중요한 요소는 랜덤 시퀀스가 갖는 확률밀도함수 형태보다는 타이닝 간격의 종류와 구성비라는 것을 알았다. 즉 서로 다른 확률밀도함수(등분포, 정규분포 그리고 역정규분포)를 갖는 경우에도 가장 좋은 성능을 나타내는 타이닝 간격의 종류와 구성비는 서로 같게 나타났다.

(5) 최적의 도로표면 프로파일(타이닝 간격 설계)은 이 연구에서 제안한 평가지표(피크비, 크레스트 팩터, 분산)를 다양한 시뮬레이션 결과에 적용하여 5가지 경우를 선정하였다. 정밀 분석한 결과 5가지 모두 등간격 타이닝 경우와 비교하였을 때 스펙트럼 피크값이 약 87~88% 감소(18 dB 감소)한 것을 볼 수 있었다. 이것은 등간격일 때와 비교하였을 때 특정 주파수에 집중되어 있던 타이어를 가진하는 입력 신호의 최대 크기가 18 dB 감소함을 나타낸다. 실제 소음 크기의 감소량은 전달경로의 동특성에 따라 그 영향

이 다르게 나타나게 되는데 이 부분은 계속해서 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

(1) Hieronimus, K. and Hellener, G., 1991, "Reduction of Car Sound Emission by Means of Systematic Development Work", Unikeller Conference, pp. 15/1~15/38.

(2) 김병삼, 홍동표, 1994, "타이어와 소음", 한국소음진동공학회논문집, 제 4 권, 제 4 호, pp. 404~412.

(3) Ziad, S. S., John, R. J., Yosef, Z. B., David, K., Alex, S. and Kristina, R., 2000, "Design of a Randomized Tining Rake for Portland Cement Concrete Pavements Using Spectral Analysis",

Transportation Research Record 1702, Paper No. 00-1136, pp. 63~68.

(4) John, H. V., "Quieting Noise Mathematically-Its Application to Snow Tire", Research Labs., General Motors Corp.

(5) David, A. K. and John, R. J., 2000, "Noise Characteristics of Pavements Surface Texture in Wisconsin", Transportaton Reaserch Record 1544, pp. 24~35.

(6) Richard, L. B., 1995, "Evaluating Pseudo-random Number Generators", Computer & Graphics, Vol. 19, No. 2, pp. 315~324.

(7) James, E. G., 2003, "Random Number Generation and Monte Carlo Method", Springer.

(8) Lewis, P., Goodman, A. and Miller, J., 1969, "A Pseudo-random Number Generator for the System 360," IBM Syst. J., 8, 136.

(9) Richard, S. F. and Donald, E. B., 2000, "Theory and Design for Mechanical Measurements", John Wiley & Sons.